

DOI: 10.7652/xjtuxb201611020

双参数组合优化的复合电源模式切换控制策略

严珍, 王斌, 徐俊, 曹秉刚, 续丹

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对电动汽车多模式复合电源系统的工作模式频繁切换、系统参数优化不易实现的问题, 结合超级电容荷电状态、需求功率以及部件效率, 提出一种基于平均功率和滞环控制的双参数组合优化切换控制策略。通过实时平均功率跟踪和滞环控制来避免工作模式频繁切换, 提高系统稳定性; 通过建立双参数组合优化的模拟退火目标函数来优化系统工作效率。对所搭建的复合电源系统仿真模型与实车测试进行比较验证, 结果表明: 采用双参数组合优化切换控制策略能降低复合电源工作模式切换频率和电池输出频率, 有效保证了系统的稳定性和电池安全, 从而提高系统效率和延长电池使用寿命; 与基线控制策略相比, 实车测试时复合电源系统工作效率提高了 1.8%。该结果可为电动汽车复合电源系统研究提供参考。

关键词: 电动汽车; 复合电源; 双参数优化; 切换控制策略

中图分类号: U469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)11-0129-07

Double Parameter Optimization and Mode Switch Strategy for a Hybrid Energy Storage System

YAN Zhen, WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, XU Dan

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To avoid frequent mode switching and optimize the system control parameters for multi-mode hybrid energy storage system (HESS), a mode switch strategy with double parameter optimization (DPO) is proposed. Combining the state of charge (SOC) of ultra-capacitor (UC), power demand and the component efficiency, the DPO is integrated with the hysteresis control based on the real-time average power. The frequent mode switching can be effectively avoided and the system stability of the multi-mode HESS can be improved via the hysteresis control. To achieve the optimization of the overall system efficiency, the goal function of the simulated annealing optimization is established. The simulations and experiments verify the effectiveness of the DPO switch strategy. A comparison shows that the DPO switch strategy enables to reduce the frequencies of mode switching and of battery power output. The system stability and the battery safety are effectively guaranteed, and the overall system efficiency is improved and the battery life is extended simultaneously. Compared with the rule-based strategy, the overall system efficiency is improved up to 1.8%.

Keywords: electric vehicles; hybrid energy storage system; double parameter optimization; switch control strategy

相比于传统内燃机汽车,纯电动汽车(EV)具有高效率 and 零排放的绝对优势,是目前公认的最具潜力的生态交通工具^[1-3]。然而,常用的锂电池能量存储系统不能同时满足电动汽车的高能量密度和高功率密度的需求,并且电池使用寿命短,废旧电池丢弃引发污染等问题亟待解决^[4-6]。超级电容-锂电池组成的复合电源系统,能有效提升汽车加速性能,延长电池使用寿命,实现优势互补^[7-8]。

复合电源系统有多种结构^[7,9-11]。近年来,具备多种工作模式的复合电源系统,可根据电动汽车运行模式选择最佳的工作模式,控制也更加灵活,已成为国内外的重点研究方向^[2-4,12-13]。多模式复合电源系统切换方案较多,基于切换控制的能量管理策略难度增加^[3-4]。常见的复合电源能量管理策略有基线控制^[2]、小波变换控制^[14-16]、滤波控制^[17-18]、基于车速的功率分配控制^[6,8]、模糊逻辑控制等^[19]。基线控制不能及时在线调整;超级电容滤波控制是一种被动控制方法,不能很好地适应工况变化;基于车速的功率分配控制未考虑汽车动力需求的影响;模糊控制需要设计多个模糊控制器对应于子工作模式,由此增加了控制器设计的难度。

多模式复合电源能量管理系统的主要难点在于,工作模式经常跳变,控制参数难以预测和优化^[2,12]。模拟退火算法适用于多模式复合电源系统能量管理优化^[1,6,8]。文献[1]中仅采用模拟退火算法对超级电容自适应电压进行单参数优化,虽然系统效率有所改善,但电池输出频率仍有待改进。

如果电池能响应实时功率的需求,则不可避免输出频率过高。采用平均功率的概念在文献[2,7]中提出,其可降低电池输出功率的峰值和频率。此外,基于超级电容荷电状态(SOC)的滞环控制策略与平均功率结合,设计工作模式切换缓冲区间,可进一步降低工作模式切换频率^[9,20]。基于此,本文提出一种基于平均功率跟踪和滞环控制的双参数组合优化(DPO)切换控制策略,即在实时平均功率跟踪和滞环控制的基础上,采用模拟退火算法对超级电容 SOC 参考值和电池输出功率参考值进行双参数组合优化,降低系统的模式切换频率和能量损失,提升系统效率。

1 多模式复合电源结构及分析

1.1 多模式复合电源结构

多模式复合电源系统如图 1 所示^[3,20],其中超级电容电压高于电池组电压。与半主动结构相比,

该电源系统仅增加了切换开关 S 和功率二极管,可主动进行模式切换。超级电容通过切换开关并联在电机逆变器两端,可作为低通滤波器使用;电池组在大功率输出时通过直流变换器(DC-DC)提供恒定功率或补偿功率,而在小功率输出时单独提供功率,减小能量损失。

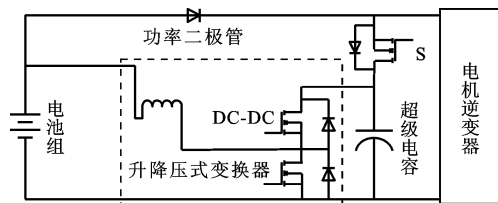


图1 多模式复合电源系统

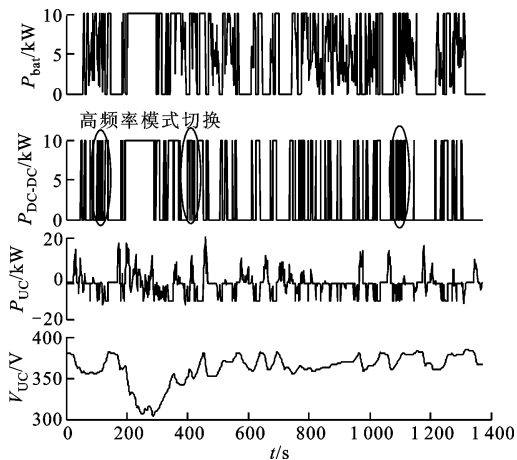
通过控制 DC-DC 和切换开关,多模式复合电源系统具备 4 种输出工作模式(超级电容单独输出模式,电池单独输出模式,电池/超级电容,即 Battery/UC 工作模式,以及超级电容/电池,即 UC/Battery 工作模式)和 2 种制动工作模式(超级电容单独回收模式,共同回收模式)^[1,4],其中超级电容/电池工作模式对应电池电量消耗殆尽,需跛行至附近充电桩或充电站^[5],此时为避免电池过放电,DC-DC 通过对超级电容降压来实现电池充电。

1.2 多模式复合电源分析

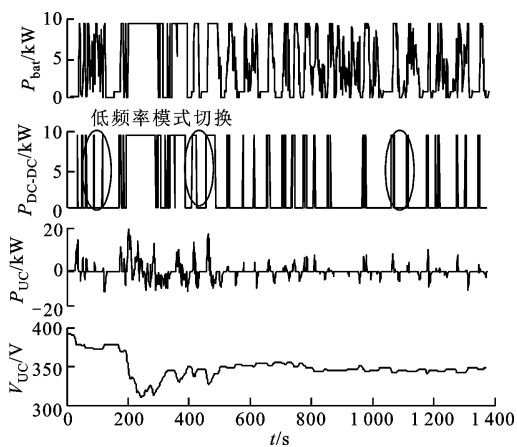
多模式复合电源存在工作模式频繁切换的缺点。定义双参数为超级电容 SOC 参考值 S_{UC}^{ref} 和电池输出功率参考值 P_{bat}^{ref} 。通过仿真发现,双参数对系统模式切换频率有较大影响,这些影响难以通过建立模型进行描述。图 2 是基线控制策略在 UDDS (1972 年美国环保局认证车辆排放的测试程序)工况下采用不同参考值的仿真结果,仿真主要参数:DC-DC 最高效率为 10 kW;电池组为 288V/80A·h 的标准模块,最大输出功率约为 20 kW;超级电容为 400 V/16 F,最大输出功率约为 40 kW。图 2a 中 $S_{UC}^{ref}=0.9$, $P_{bat}^{ref}=10\ 200\ W$,图 2b 中 $S_{UC}^{ref}=0.87$, $P_{bat}^{ref}=9\ 800\ W$ 。显然,图 2b 在工作模式切换频率和电池输出功率频率上均显著优于图 2a。因此,对双参数 S_{UC}^{ref} 和 P_{bat}^{ref} 进行组合优化,可以有效降低电池输出功率频率和工作模式切换频率,从而提高系统稳定性,降低切换过程中的能量损失。

双参数 S_{UC}^{ref} 和 P_{bat}^{ref} 对系统性能的影响需深入研究。参数优化的难点在于不仅要提升系统效率,还要避免高频模式切换,并且优化算法应尽量简单。下面将设计双参数组合优化切换控制策略,在实时平均功率跟踪和滞环控制的基础上,采用模拟退火

算法对超级电容 SOC 参考值和电池输出功率参考值进行双参数组合优化。



(a) $S_{UC}^{ref} = 0.9, P_{bat}^{ref} = 10\ 200\ W$



(b) $S_{UC}^{ref} = 0.87, P_{bat}^{ref} = 9\ 800\ W$

图 2 双参数基线控制仿真结果

2 能量管理策略及优化

2.1 主要部件效率

为设计合理的切换控制策略,综合考虑了需求功率、超级电容 SOC 和部件效率。复合电源系统主要部件包括超级电容、电池和 DC-DC。根据开路电压模型^[2],电池或超级电容效率为

$$\eta_i = 100\% - P_i R_i / (V_i E_i) \quad (1)$$

式中: $i = \{\text{电池 (bat)}, \text{超级电容 (UC)}\}$; P_i 、 V_i 、 R_i 、 E_i 分别是电池或超级电容的输出功率、输出电压、内阻和开路电压。

DC-DC 效率通过实验测试得出,图 3 是 2.5 kW DC-DC 在不同运行条件下的效率曲面。仿真时,采用多个 DC-DC 并联,假设各自效率互不影响,最高效率设计为 10 kW。

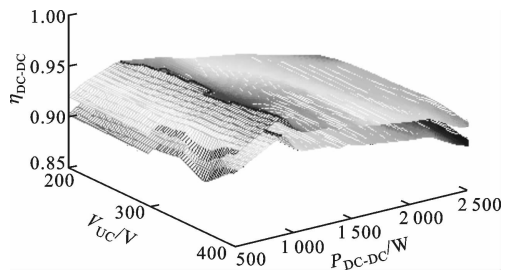


图 3 DC-DC 效率曲面

2.2 实时平均功率和滞环控制

在 UDDS 工况下,实时功率与实时平均功率如图 4 所示。由于复合电源的超级电容需保证系统提供 30 s 的峰值功率,因此实时平均功率取 30 s 内的平均值,计算式如下

$$P_{ave} = \left(\int_t^{t+30s} P_{dem} dt \right) / T_s, \quad t \geq 30\ s \quad (2)$$

$$P_{ave} = \left(\int_0^t P_{dem} dt \right) / t, \quad 0 < t < 30\ s \quad (3)$$

式中: P_{ave} 为实时平均功率; P_{dem} 为实时功率; T_s 为超过 30 s 的时间周期。

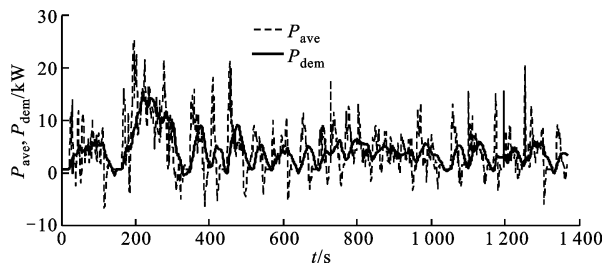


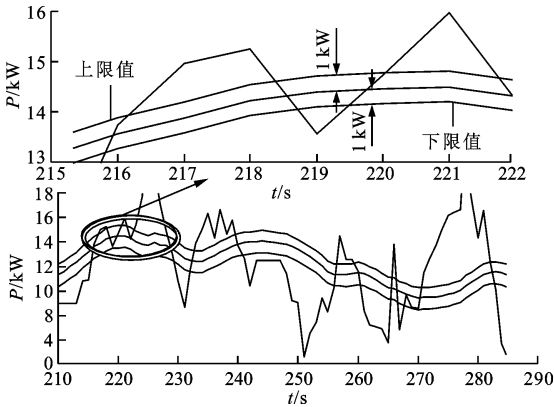
图 4 UDDS 工况下实时功率与实时平均功率

由图 4 可知,实时功率波动大,峰值高,若采用实时功率控制,将导致工作模式频繁切换和电池频繁充放电,这样会影响系统稳定性,缩短电池使用寿命。相比之下,实时平均功率的峰值和切换频率均大幅降低,采用实时平均功率作为基准控制可以有效减小电池峰值输出功率,降低工作模式切换频率,保证电池寿命,降低切换能量损失,提高系统稳定性和系统效率。

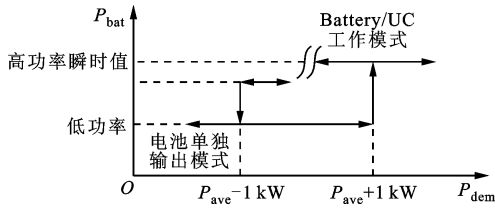
因此,本文采用实时平均功率作为基准控制。定义功率阈值 $P_{swi} = P_{ave} \pm 1\ kW$ 作为电池单独输出模式和电池/超级电容工作模式切换的分界值。当 $P_{dem} < P_{ave} - 1\ kW$ 时,采用电池单独输出模式;当 $P_{dem} > P_{ave} + 1\ kW$ 时,采用电池/超级电容工作模式; $P_{ave} \in (5\ kW, P_{bat}^{ref})$,由模拟退火算法求出 P_{bat}^{ref} 。

为降低两种工作模式在实时平均功率曲线附近的切换频率,采用功率滞环控制,在平均功率曲线上、下分别设置 $\pm 1\ kW$ 的缓冲区,进行实时平均功

率跟踪的滞环控制,如图 5 所示。



(a) 控制结果



(b) 控制方式

图 5 实时平均功率跟踪的滞环控制

2.3 双参数组合优化切换控制策略

多模式复合电源系统模式切换策略如图 6 所示。当需求功率小于 0 时,采用滞环控制回收能量;当超级电容 SOC 大于 0.95 时采用共同回收模式,当超级电容 SOC 小于 0.9 时采用超级电容单独回收模式,超级电容 SOC 在[0.9,0.95]区间为滞环控制区域,可避免工作模式频繁切换。当电池 SOC 小于 0.1 时,通常采用超级电容/电池工作模式,电量不足($S_{UC} < 0.75$)时,系统报警,同时进行功率补偿^[1],补偿规则为

$$P_{bat} = (P_{bat}^{max} - P_{bat}^{const}) \frac{(0.75 - S_{UC})}{(0.75 - 0.5)} + P_{bat}^{const} \quad (4)$$

式中: P_{bat}^{max} 为采用最大功率补偿控制时的电池输出功率; P_{bat}^{const} 为采用恒功率控制时的电池输出功率;0.75 表示超级电容所储存能量的 75%可用于传递;0.5 为超级电容 SOC 设定的下限值。

$S_{UC} > S_{UC}^{ref}$ 时,采用多模式复合电源系统的滞环切换策略可以降低模式切换频率,提高系统稳定性。为了保证系统效率最高,目标函数选为基于 UDDS 全局路况的系统最高效率

$$f(k) = \max \bar{\eta}_{sys}(S_{UC}^{ref}, P_{bat}^{ref}) = \max \left\{ \frac{\int_0^{t_p} P_{dem} dt}{\int_0^{t_p} P_{bat} dt + \int_0^{t_p} P_{UC} dt} \right\} \quad (5)$$

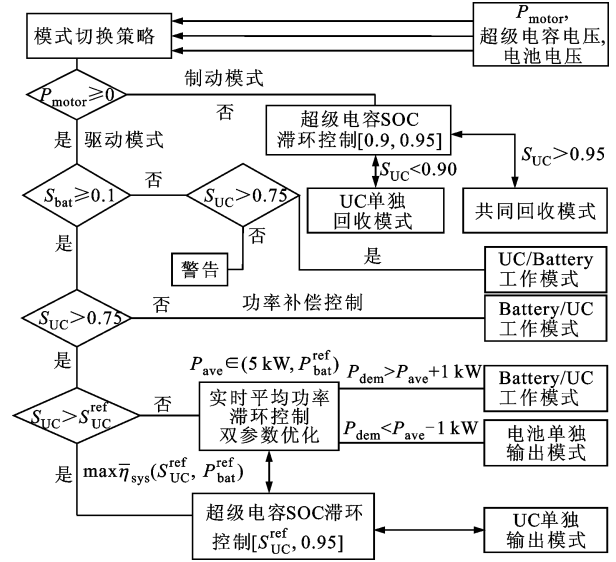


图 6 多模式复合电源系统工作模式切换策略

根据 DC-DC 最高效率,确定电池参考输出功率的初值 $P_{bat}^{ref}(0) = 10 \text{ kW}$,根据基线控制策略,确定超级电容 SOC 参考值的初值 $S_{UC}^{ref}(0) = 0.85$ 。

模拟退火算法理论上具有概率的全局优化性能,已被用于复合电源功率跟踪控制^[8]。模拟退火算法可以对超级电容 SOC 参考值和电池输出功率参考值进行双参数组合优化,并不断地向最高效率点趋近,从而提高 UDDS 全局路况下的系统效率。

基于模拟退火算法获得的最优系统效率 $f(k^*) = f(k) = \max \bar{\eta}_{sys}(S_{UC}^{ref}(k), P_{bat}^{ref}(k))$ (6) 其他条件下最优解更新为下一次搜索值对应的系统效率

$$f(k^*) = f(k+1) = \max \bar{\eta}_{sys}(S_{UC}^{ref}(k+1), P_{bat}^{ref}(k+1)) \quad (7)$$

式中: k 为当前迭代解, $k=80$; k^* 为最优解。

3 仿真与实验

在 Simulink 软件中建立了小型电动汽车仿真模型,如图 7 所示, S_{UC}^{ref} 和 P_{bat}^{ref} 的优化结果如图 8 所示。在 UDDS 工况下,双参数优化结果为 $S_{UC}^{ref} = 0.85$, $P_{bat}^{ref} = 9 \text{ } 100 \text{ W}$ 。可以看出,采用模拟退火算

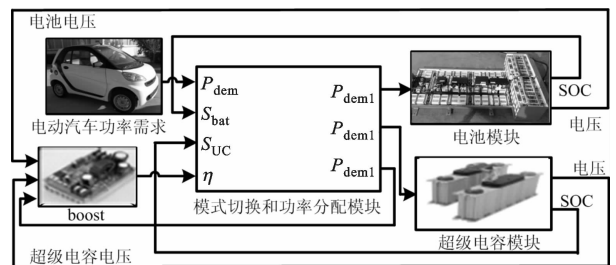


图 7 小型电动汽车仿真模型

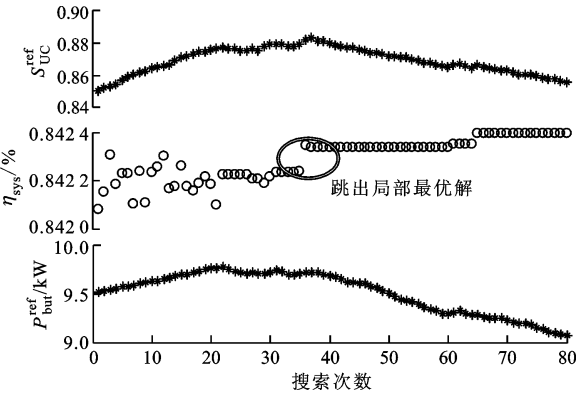


图 8 UDDS 工况下优化结果

法,系统最高效率跳出了局部最优解。

在 UDDS 工况下,对 DPO 切换控制和基线控制策略进行对比仿真,结果如图 9 所示。两种控制策略的超级电容 SOC 初值均设置为 $S_{UC} > 0.95$ (390 V)。采用 DPO 切换控制策略,初始阶段为 UC 单独输出模式; $S_{UC}^{ref} < S_{UC} < 0.95$ 时,若需求功率低,采用电池单独输出模式,否则采用电池/超级电容工作模式;若需求功率为负,采用超级电容单独回收模式。两种控制策略在多模式复合电源系统下的功率分配有差异,采用 DPO 切换控制策略时,电池/超级电容模式下电池通常输出最优功率,尤其是当超级电容 SOC 较低时,还需采用功率补偿控制。基线控制侧重 DC-DC 最高运行效率,在电池/超级电容模式下,电池输出功率大约是 10 kW,由于 $S_{UC} > 0.75$,基线控制没有功率补偿。UDDS 工况下的对比仿真结果显示,在高频需求功率下,DPO 切换控制比基线控制更有效。DC-DC 能量损失和系统效

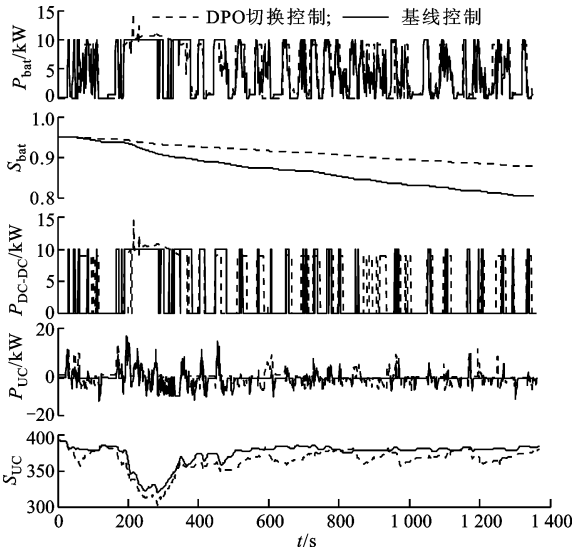


图 9 UDDS 工况下控制策略对比仿真结果

率对比结果如表 1 所示。复合电源系统的效率

$$\bar{\eta}_{sys} = \int_0^{t_p} P_{inv} dt / \left[\int_0^{t_p} P_{bat}(t) + P_{UC}(t) dt \right] \quad (8)$$

仿真结果表明,基线控制策略侧重 DC-DC 的最高效率,而 DPO 切换控制则采用模拟退火算法进行双参数优化,使系统效率提升了 2.4%。

为了验证 DPO 切换控制策略,利用模拟负载进行对比实验,即采用 4 个电池(3.2 V/20 A·h)和 1 个超级电容(25 V/18 F)分别与升降压式变换器(buck-boost)两端直接相连,所用 DC-DC 为 300 W,其在升压模式下最高效率为 100 W,设定 $P_{bat}^{ref} = 80$ W, $S_{UC}^{ref} = 0.8$ 。

表 1 DC-DC 能量损耗和系统效率仿真对比结果

工况	DC-DC 能量损耗/%		系统效率/%	
	DPO	基线控制	DPO	基线控制
UDDS	6.6	5.3	91.8	89.4

图 10 为多模式复合电源系统在功率模拟负载实验中采用 DPO 切换控制和基线控制策略的对比结果。需求功率通过模拟负载得到,实际电动汽车牵引电机用改装车搭载小功率电机进行模拟。

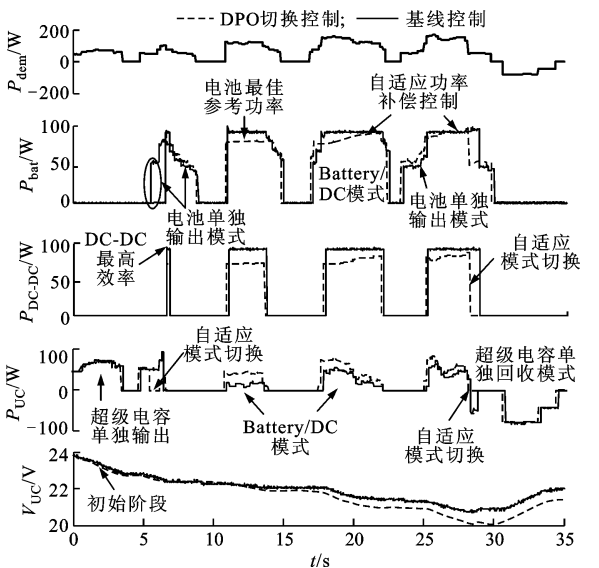


图 10 功率模拟负载对比实验

超级电容初始电压为 24 V ($S_{UC} > 0.95$)。采用 DPO 控制时,初始阶段为超级电容单独输出模式,接着超级电容 SOC 降至 $[S_{UC}^{ref}, 0.95]$,需求功率较低时采用电池单独输出,需求功率较高时采用电池/超级电容工作模式。自适应功率补偿控制在 20 s 或 25 s 之后完成。 $P_{dem} < 0$ 时,采用超级电容单独回收模式。

基线控制虽然 DC-DC 运行在最佳效率点,但不

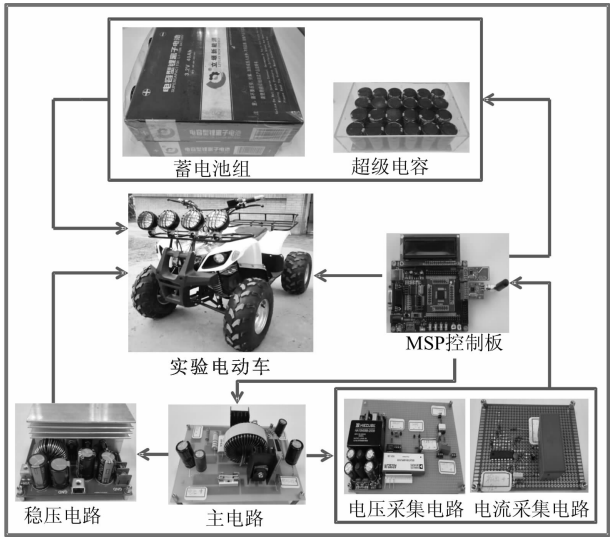
能实现功率补偿和工作模式有效切换,导致 6 s 之后超级电容单独输出模式持续运行,28 s 后电池/超级电容模式持续运行。DPO 可以实现自适应模式切换,6 s 之后从超级电容单独输出模式主动切换为电池单独输出模式,28 s 后从电池/超级电容工作模式切换为电池单独输出模式。由于电池单独输出模式是主动切换的,可以减少 DC-DC 能量损失。

实验结果如表 2 所示,结果表明,系统损耗不仅包括 DC-DC 损耗,还包括电池组损耗、超级电容损耗以及电机逆变器损耗。相比于基线控制,DPO 使多模式复合电源系统工作效率提高了 1.8%。

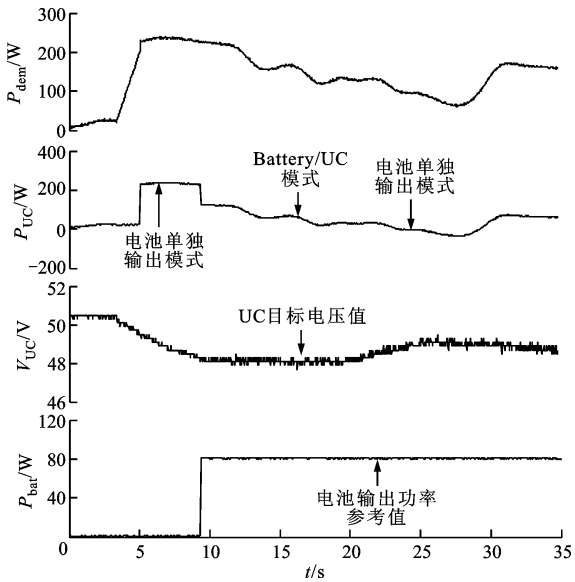
DC-DC 能量损耗/%		系统效率/%	
DPO 控制	基线控制	DPO 控制	基线控制
4.3	4.2	92.3	90.5

为了进一步验证 DPO 切换控制策略,对改装实车进行了测试。实车测试平台如图 11a 所示,其中:电池组标准电压为 25.6 V,容量为 55A·h;超级电容为 60 V/15.6 F,目标电压设计为 48 V;其他实验条件和参数设置与上述模拟负载实验相同。

实车测试结果如图 11b 所示。超级电容初始电压为 50.49V ($S_{uc} > 0.95$)。采用 DPO 控制时,初始阶段为超级电容单独输出模式;9 s 之后,超级电容 SOC 降至 $[S_{uc}^{ref}, 0.95]$,采用电池/超级电容工作模式,超级电容电压稳定在目标值 48 V 附近;23~25 s 时需求功率较低,采用电池单独输出模式,电池输出功率稳定在目标值 80 W 附近。实验结果表明:在多模式复合电源系统中,DPO 切换控制策略



(a) 实车测试平台



(b) 实车测试结果

图 11 实车测试平台及实验结果

能有效跟踪功率需求,选择相对应的最佳工作模式,超级电容能及时提供峰值功率,保证系统效率最高和电池安全。

4 结 论

为避免多模式复合电源系统工作模式频繁切换,同时实现系统效率优化,本文提出了一种基于平均功率跟踪和滞环控制的 DPO 切换控制策略。采用实时平均功率和滞环控制切换降低工作模式切换频率;根据需求功率、超级电容 SOC 和主要部件效率,采用模拟退火算法对超级电容 SOC 参考值和电池输出功率参考值进行组合优化,提高复合电源系统效率。

在 Simulink 软件中建立了多模式复合电源系统仿真模型,仿真结果显示,DPO 切换控制策略不仅可以降低工作模式切换频率,还能降低电池输出功率频率。利用超级电容提供或吸收峰值功率、回收制动能量,有效确保了电池安全。仿真时,UDDS 工况下多模式复合电源系统效率提升了 2.4%。搭建复合电源系统实车测试平台进一步验证了 DPO 切换控制策略,结果显示,采用 DPO 切换控制策略,复合电源系统工作模式更灵活,可在超级电容 SOC 较低的条件下进行实时功率补偿。与基线控制策略相比,系统效率提升大约 1.8%。

参考文献:

[1] 王斌,徐俊,曹秉刚,等. 采用模拟退火算法的电动汽车复合电源能量管理系统优化 [J]. 西安交通大学

- 学报, 2015, 49(8): 90-96.
- WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. Optimization of energy management system with simulated annealing approach for hybrid power source in electric vehicles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(8): 90-96.
- [2] WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. A novel multimode hybrid energy storage system and its energy management strategy for electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2015, 281: 432-443.
- [3] 王斌, 徐俊, 曹秉刚, 等. 电动汽车的多模式复合电源能量管理自适应优化 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(12): 130-136.
- WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. Adaptive optimization of energy management strategy for a multi-mode hybrid energy storage system in electric vehicles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(12): 130-136.
- [4] WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. Compound-type hybrid energy storage system and its mode control strategy for electric vehicles [J]. Journal of Power Electronics, 2015, 15(3): 849-859.
- [5] 王斌, 徐俊, 曹秉刚, 等. 一种新型电动汽车复合电源结构及其功率分配策略 [J]. 汽车工程, 2015, 37(9): 1053-1058.
- WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. A novel hybrid power configuration and its power distribution strategy for electric vehicles [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(9): 1053-1058.
- [6] TROVÃO J P F, PEREIRINHA P G, JORGE H M, et al. A multi-level energy management system for multi-source electric vehicles; an integrated rule-based meta-heuristic approach [J]. Applied Energy, 2013, 105(2): 304-318.
- [7] CAO J, EMADI A. A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 122-132.
- [8] TROVÃO J P F, SANTOS V D N, PEREIRINHA P G, et al. A simulated annealing approach for optimal power source management in a small EV [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 867-876.
- [9] SONG Z, LI J, HAN X, et al. Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles [J]. Applied Energy, 2014, 135: 212-224.
- [10] CASTAINGS A, LHOMME W, TRIGUI R, et al. Comparison of energy management strategies of a battery/supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints [J]. Applied Energy, 2016, 163: 190-200.
- [11] XIANG C, WANG Y, HU S, et al. A new topology and control strategy for a hybrid battery-ultracapacitor energy storage system [J]. Energies, 2014, 7(5): 2874-2896.
- [12] TAESIK P, TAEHYUNG K. Novel energy conversion system based on a multimode single-leg power converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 213-220.
- [13] REN G, MA G, CONG N. Review of electrical energy storage system for vehicular applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 225-236.
- [14] DUSMEZ S, KHALIGH A. A supervisory power splitting approach for a new ultracapacitor-battery vehicle deploying two propulsion machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(3): 1960-1971.
- [15] KIM N H, YANG O, KIM M H. BLDC motor control algorithm for industrial applications using a general purpose processor [J]. Journal of Power Electronics, 2007, 7(2): 132-139.
- [16] 韩晓娟, 陈跃燕, 张浩, 等. 基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 8-13.
- HAN Xiaojuan, CHEN Yueyan, ZHANG Hao, et al. Application of hybrid energy storage technology based on wavelet packet decomposition in smoothing the fluctuations of wind power [J]. Journal of Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 8-13.
- [17] 王同景. 电动汽车复合电源能量管理策略研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015: 1-7.
- [18] AWERBUCH J J, SULLIVAN C R. Filter-based power splitting in ultracapacitor-battery hybrids for vehicular applications [C]// 2010 IEEE 12th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-8.
- [19] HERRERA V, MILO A, GAZTAÑAGA H, et al. Adaptive energy management strategy and optimal sizing applied on a battery-supercapacitor based tramway [J]. Applied Energy, 2016, 169: 831-845.
- [20] WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. Design of a novel hybrid power for EV [C]// 2014 ITEC Asia-Pacific. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-5.

(编辑 苗凌)